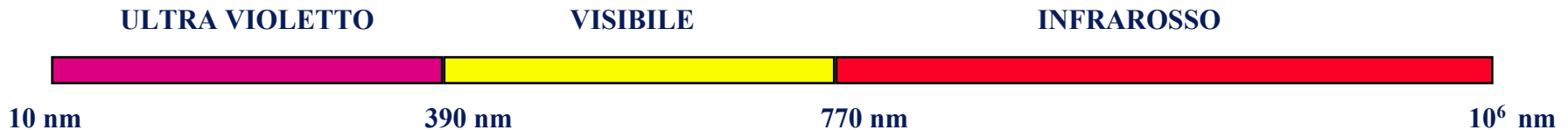
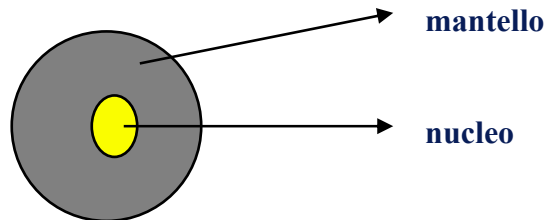
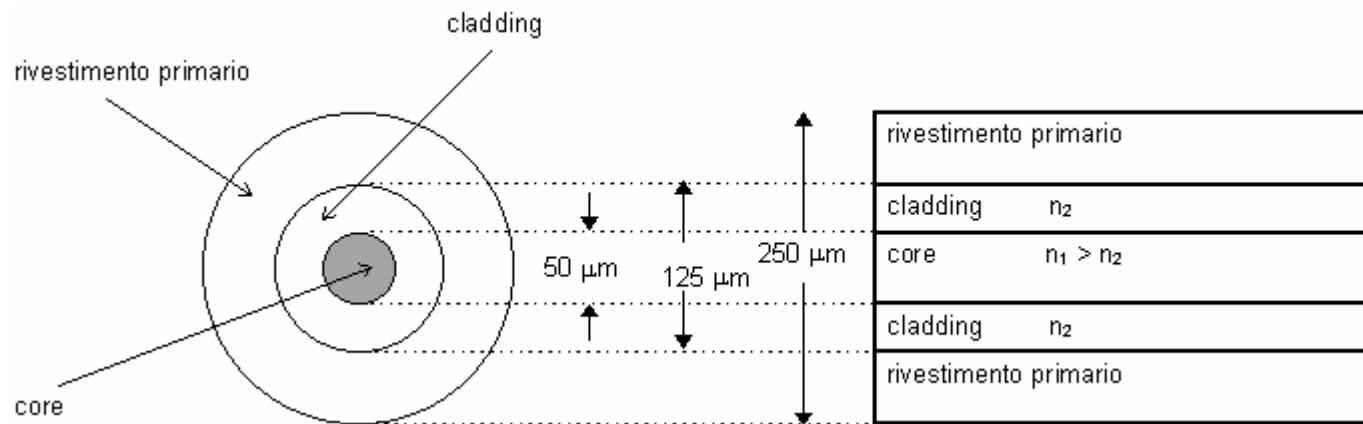
Fibre ottiche

FIBRE OTTICHE

- Le fibre ottiche operano nelle bande infrarosso, visibile e ultravioletto.
- La lunghezza d'onda di tali bande è: (1 nm = 10^{-9} m)

- **Una fibra ottica è costituita da un cilindro interno detto nucleo (core), con indice di rifrazione uguale a n_1 e da una corona esterna detta mantello (cladding), con un indice di rifrazione n_2.**

ESEMPIO :
diametro nucleo : 2,5 μm, n_1 =1,527
diametro mantello : 40 μm, n_2 =1,517

Fibre ottiche

- Una fibra ottica è realizzata in vetro o silicio fuso, e purchè il materiale sia un dielettrico trasparente alla luce, può essere realizzata anche in plastica. Il suo utilizzo è quello di trasportare energia luminosa in modo guidato. Una caratteristica che deriva direttamente dalla sua natura, è l'immunità della fibra ottica ai disturbi di natura elettromagnetica; tale proprietà impedisce fenomeni di interferenza (diafonia), così come non permette di prelevare segnale dall'esterno (intercettazione).

Alcuni esempi

Le fibre vengono indicate indicate attraverso il diametro del nucleo (N) e quello del mantello (M) scritti in questo modo:

N/M

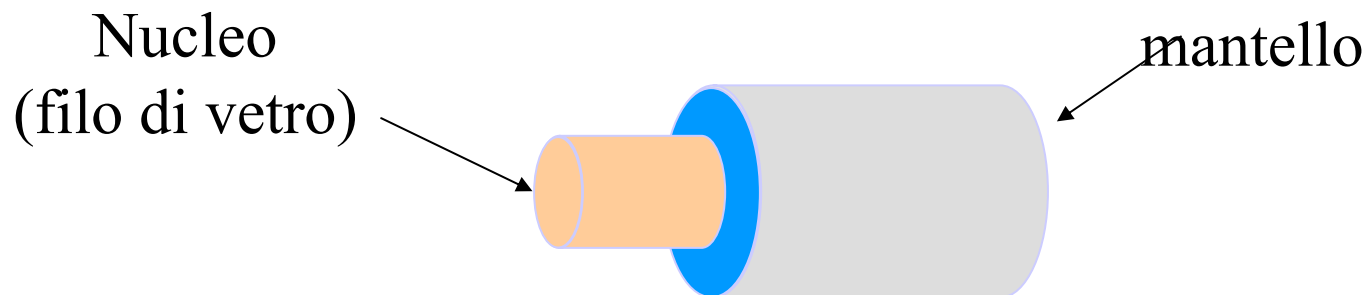
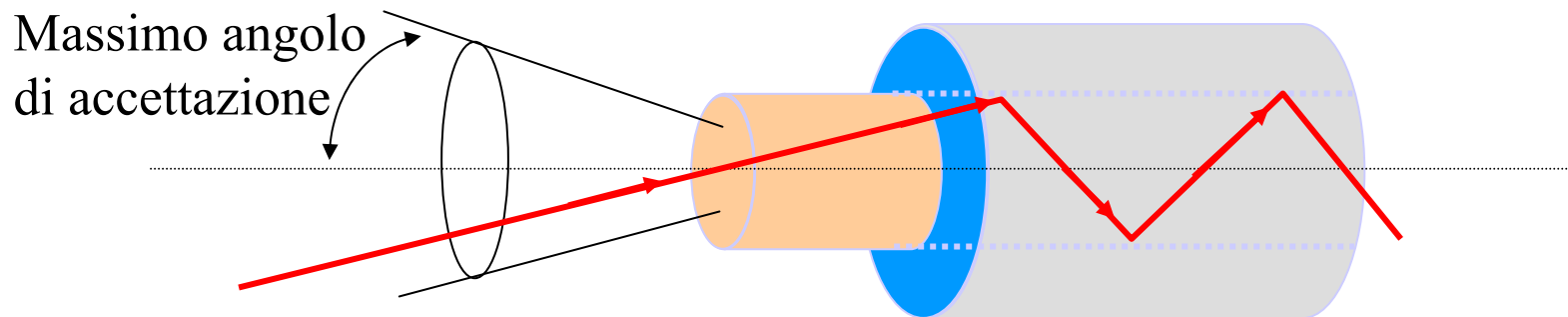
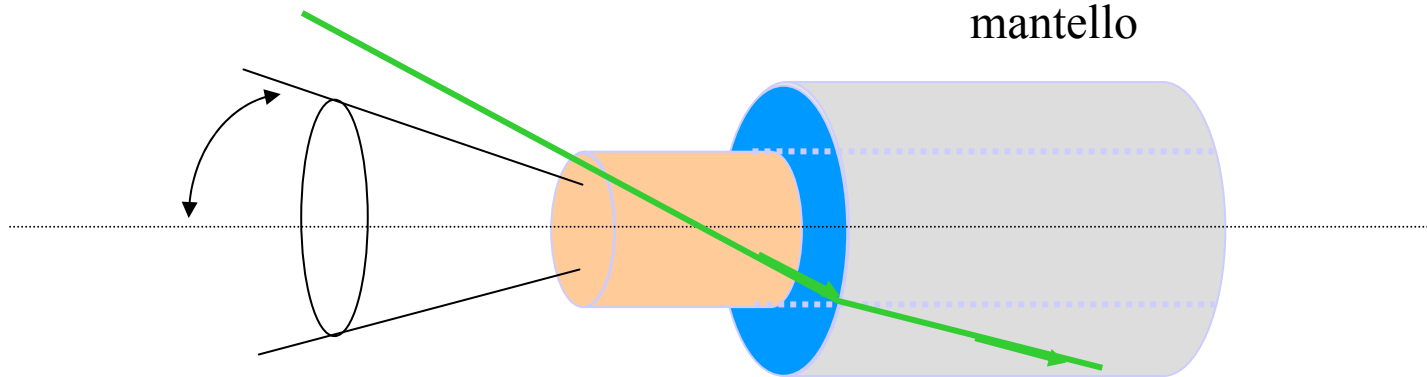
N ed M sono espressi µm (0.000001 m)
e specificando se sono monomodali o multimodali

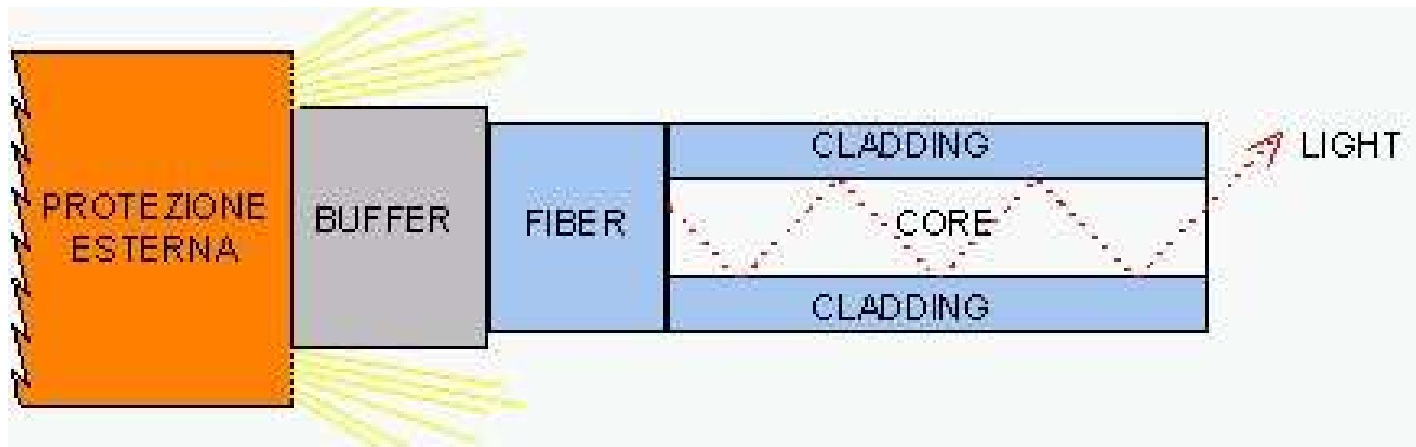
Due tipiche fibre multimodali sono 50/125 e 62.5/125 mentre una fibra monomodale è 10/125

Fibra ottica

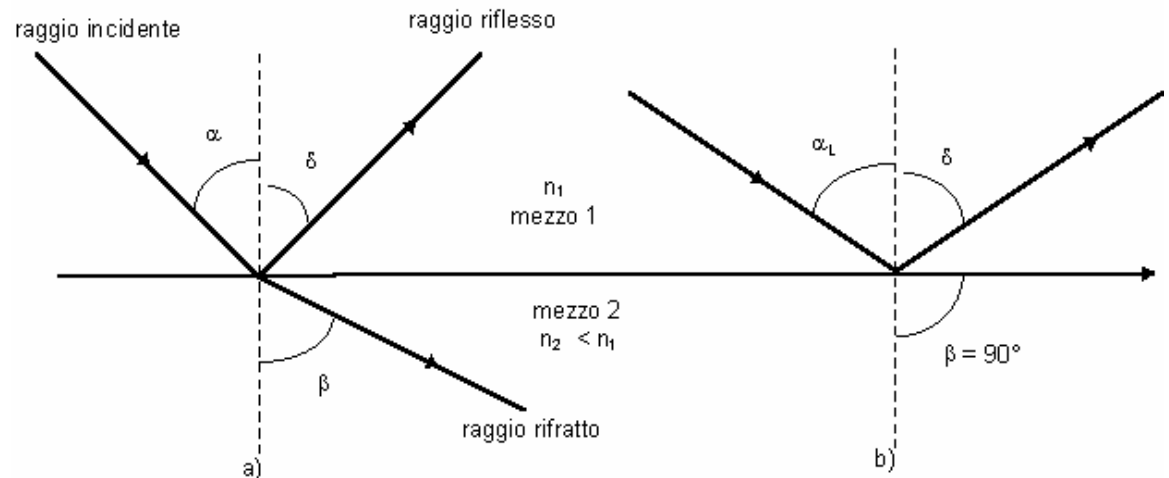
Le prime fibre ottiche furono realizzate nel 1953. Tuttavia il loro impiego era limitato dalle grandi attenuazioni.
L'ampiezza del segnale ricevuto da una fibra lunga 1 Km risultava 10^{100} volte inferiore rispetto all'ampiezza del segnale trasmesso.

I valori di attenuazione ottenuti con le odierne tecnologie sono tali per cui:
ampiezza segnale ricevuto > 0.96 * ampiezza segnale trasmesso

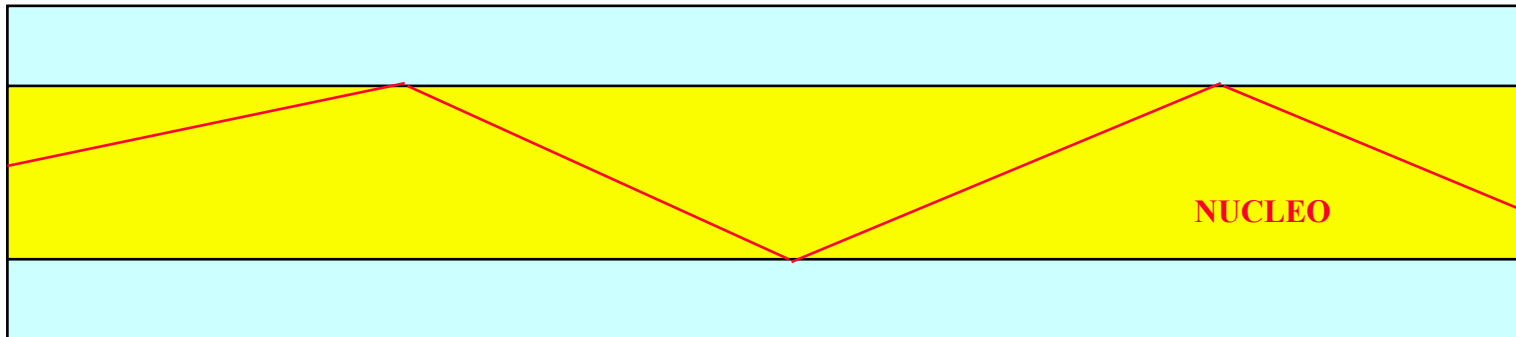
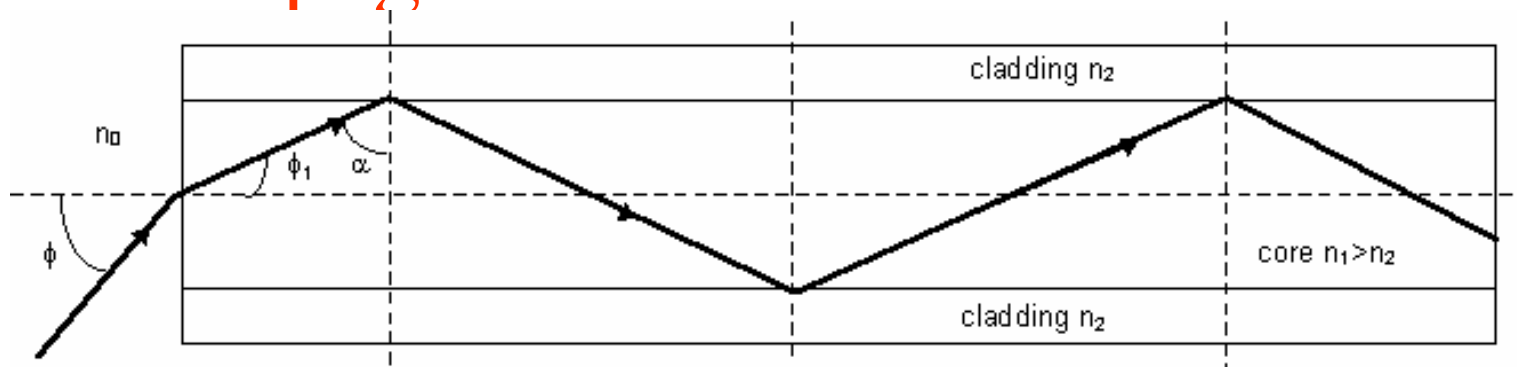
Una fibra ottica si presenta come un sottile filo di materiale vetroso costituito da due parti: il nucleo (core) ed il mantello (cladding)

Fibra ottica: come funziona?

Fibra ottica

Ci sono poi altri rivestimenti e strati protettivi:

Un cavo in fibra ottica possono contenere più fibre, addirittura alcune decine o centinaia.

Riflessione e rifrazione

- La velocità della luce varia sensibilmente a seconda del mezzo attraversato. Nel vuoto tale velocità si indica con *c* e vale: $c = 3 \cdot 10^8$ **m/s**
- Nei materiali a maggior densità, la velocità della luce, indicata con *v*, è inferiore. Si definisce indice di rifrazione il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto *c* rispetto a quella nel mezzo *v* e si indica con $n=c/v$.
- Un raggio di luce che viaggia in un mezzo 1 con indice di rifrazione n_1 e che entra in un mezzo 2 con indice di rifrazione n_2 diverso da n_1, si divide in un raggio riflesso nel mezzo 1 e in un raggio rifratto che si propaga nel mezzo 2.
- L'angolo di rifrazione dipende da quello di incidenza e dagli indici di rifrazione dei due mezzi.

- Se $n_1 > n_2$ si ha: $\beta > \alpha$. All'aumentare dell'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta.
- Angolo limite: angolo α_L per cui $\beta=90°$, scompare la rifrazione e tutto ils egnale viene riflesso.

FIBRE OTTICHE

- **n_1 viene scelto leggermente superiore a n_2. In questo modo la propagazione del segnale ottico avviene nel nucleo per successive riflessioni sulla superficie di separazione tra nucleo e mantello.**

Propagazione nella fibra

- Scegliendo opportunamente l'angolo massimo Φ di incidenza del segnale ottico nella fibra, si può fare in modo che il segnale si propaghi solo nel nucleo.
- La propagazione avviene nell'interno del nucleo se: $\text{sen}(\Phi) = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ per cui $\Phi \leq \text{arcsen}(NA)$
- Se $n_1 = n_2$ si ha: NA = 0 e quindi $\phi_M = 0$. In questo caso la propagazione può avvenire solo se si inviano raggi luminosi perfettamente paralleli all'asse del core: tuttavia, questo è difficile da realizzare.
- Se n_1 è abbastanza diverso da n_2 si ottiene una elevata apertura numerica, elevato angolo di accettazione ϕ_M (condizione vantaggiosa) ma piccolo angolo limite che costringe il fascio a procedere fortemente a zig-zag all'interno della fibra.

Propagazione nella fibra

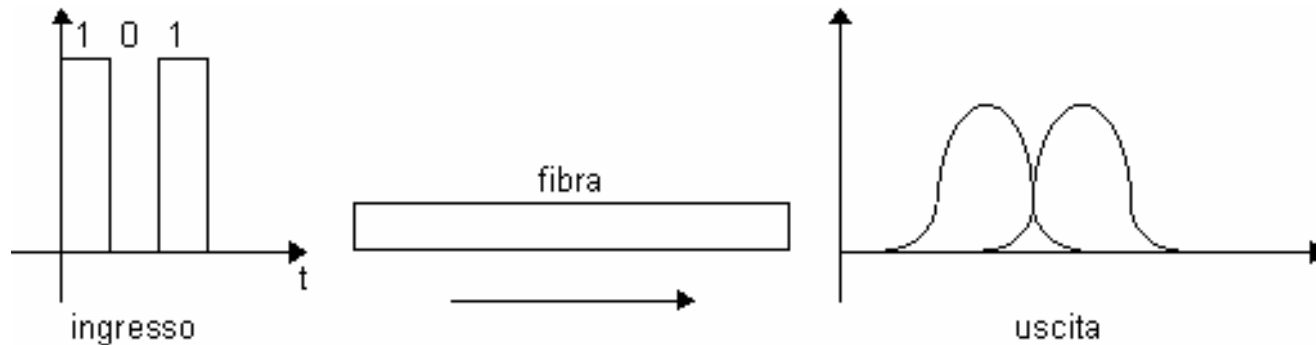
- Nel caso in cui l'impulso di luce di breve durata è costituito da raggi luminosi paralleli all'asse della fibra e da raggi con angolo di entrata di vario valore fino all'angolo di accettazione (fibra multimodale) la propagazione dei raggi lungo la fibra si completa in tempi differenti: i raggi paralleli all'asse, compiendo un percorso più breve, impiegano un tempo inferiore ai raggi con angolo di entrata nella fibra maggiore di zero. Indicando con L la lunghezza della fibra, si ha:

$$t_{\min} = \frac{L}{v} = L\frac{n_1}{c} \qquad\qquad t_{\max} = L\frac{n_1}{c\,\mathrm{sen}(\alpha_L)} = L\frac{n_1^2}{c\,n_2}$$

per cui si ha: $$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L\,n_1}{c\,n_2}(n_1 - n_2)$$

Questo fenomeno, noto come *dispersione modale*, degrada la forma dell'impulso inviato poiché lo allarga nel tempo.

Effetti della fibra sulla trasmissione di impulsi

- Nel caso di trasmissioni numeriche l'allargamento degli impulsi luminosi che transitano lungo la fibra limita la frequenza massima di lavoro.
- Nelle fibre multimodali si ricevono varie copie ritardate dello stesso segnale. Si parla in questo caso di **dispersione modale**.
- Come conseguenza si può avere la parziale sovrapposizione dei segnali uscita, fenomeno noto come interferenza intersimbolica, che compromette la corretta rivelazione dei dati.

- Il fenomeno dell'allargamento degli impulsi e dell'interferenza simbolica è particolarmente importante nelle fibre multimodali, poiché ogni modo che si propaga nella fibra segue un percorso diverso e quindi arriva in tempi diversi a destinazione. Altre cause che determinano la dispersione modale sono la superficie irregolare del mantello che provoca riflessioni anomale, conicità del nucleo che determina variazione della direzione del raggio riflesso e la superficie di giunzione tra due fibre che modifica la direzione del raggio.
- Nelle fibre monomodali si ha un solo modo che si propaga e quindi il fenomeno della dispersione modale non esiste.

Effetti della fibra sulla trasmissione di impulsi

- Per ridurre la dispersione modale occorre rendere gli indici di rifrazione n_1 e n_2 molto vicini tra loro. Al limite, se $n_1 = n_2$, si avrebbe $\alpha_L = 90°$ e quindi la luce si può propagare lungo la direzione dell'asse. In questo caso esiste una sola direzione di propagazione e quest'ultima si dice *monomodale*.
- Se n_1 è diverso da n_2 esistono più *modi* di propagazione e quest'ultima si dice *multimodale*.
- La propagazione *monomodale* si può ottenere anche con $n_1 \neq n_2$ ma rendendo il diametro del core molto piccolo e paragonabile alla lunghezza d'onda della radiazione usata. Nella propagazione monomodale, però, si penalizza l'apertura numerica.

Esempio

- Nel caso in cui n_1=1.48 e n_2=1.46 si ha:

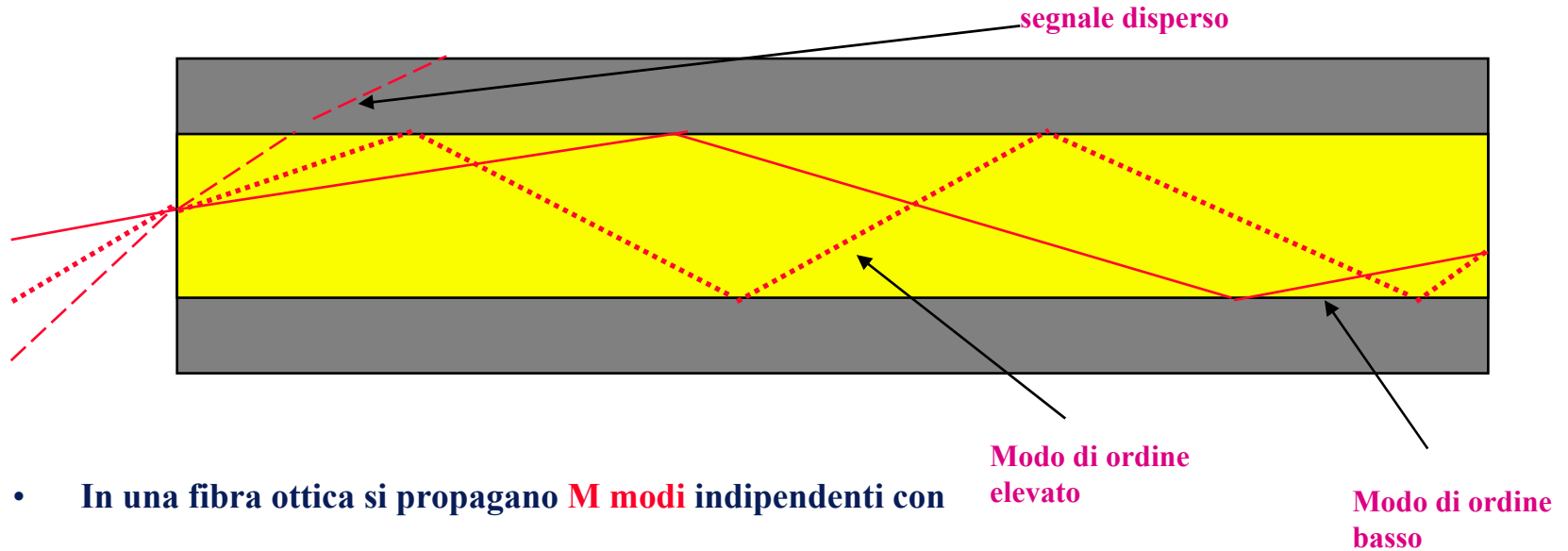
NA = 0.242; ϕ_M = 14° per n_0 = 1 e $\Delta t/L$ = 67.8 ns/Km; α_L = 80°

Numero di modi in una fibra

- Il numero di modi M che si propagano in una fibra è:

$$M = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi\, d\, NA}{\lambda}\right)^2$$

dove d = diametro del nucleo e NA l'apertura numerica e λ la lunghezza d'onda

FIBRE OTTICHE

- **In una fibra ottica si propagano M modi indipendenti con**

$$M = 0,5\ (\pi\ d\ N_a / \lambda)^2$$

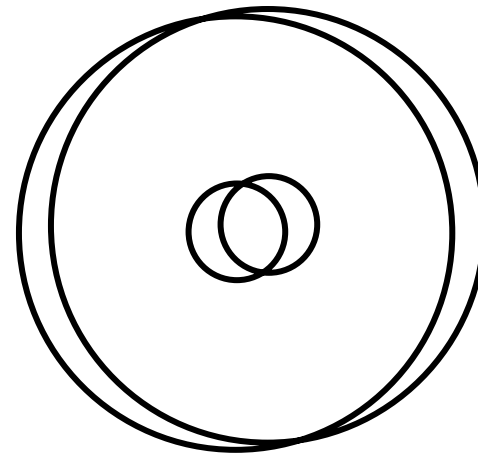
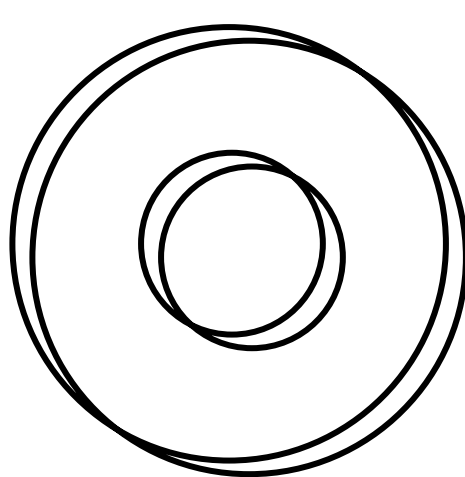
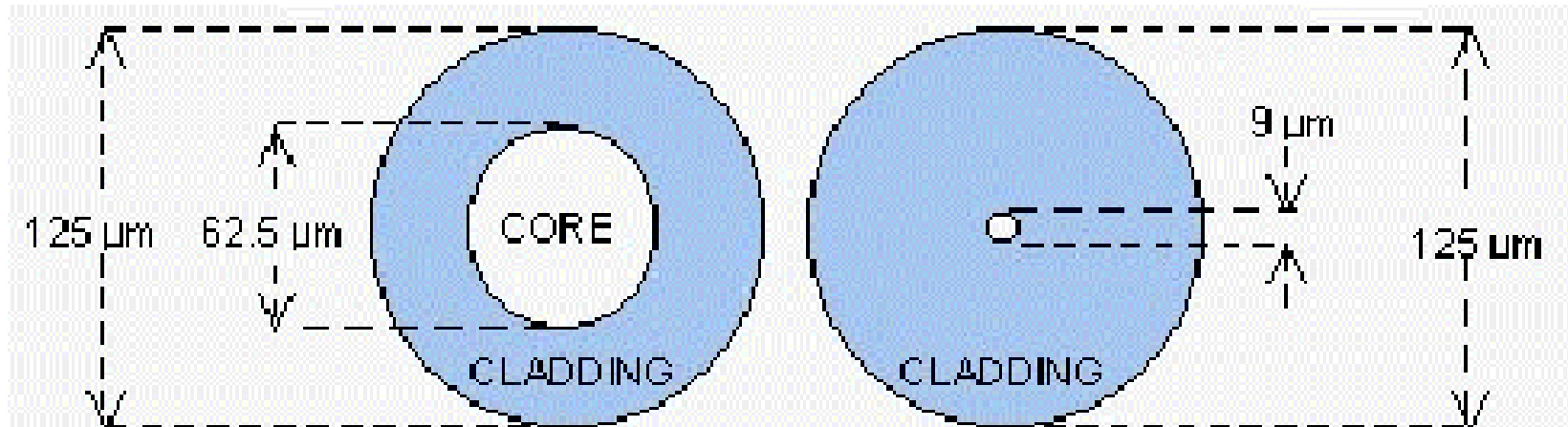
dove d= diametro del nucleo, λ = lunghezza d'onda

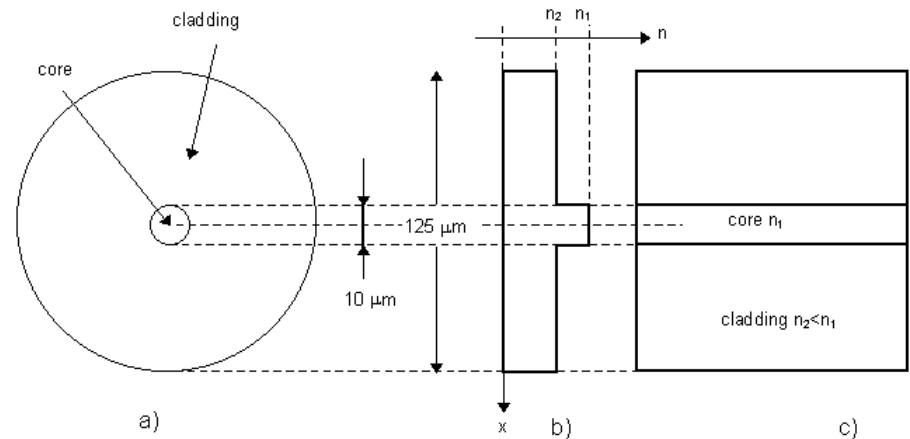
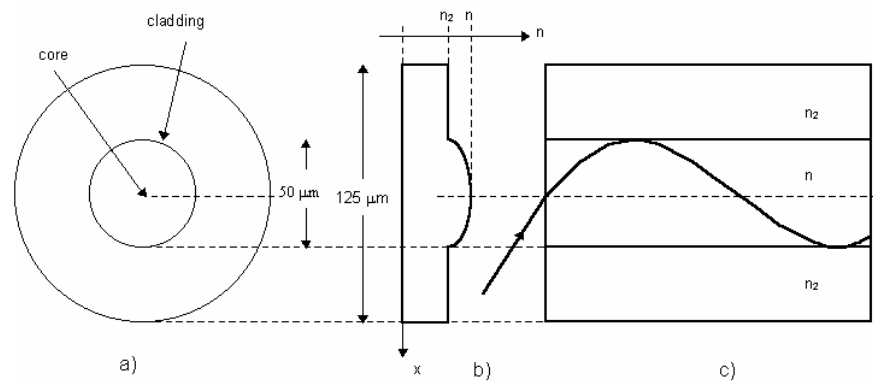
- **Se M > 1 si ha una FIBRA MULTIMODALE, che presenta un costo minore, ma anche prestazioni inferiori. Le fibre multimodali operano sostanzialmente nella prima finestra.**

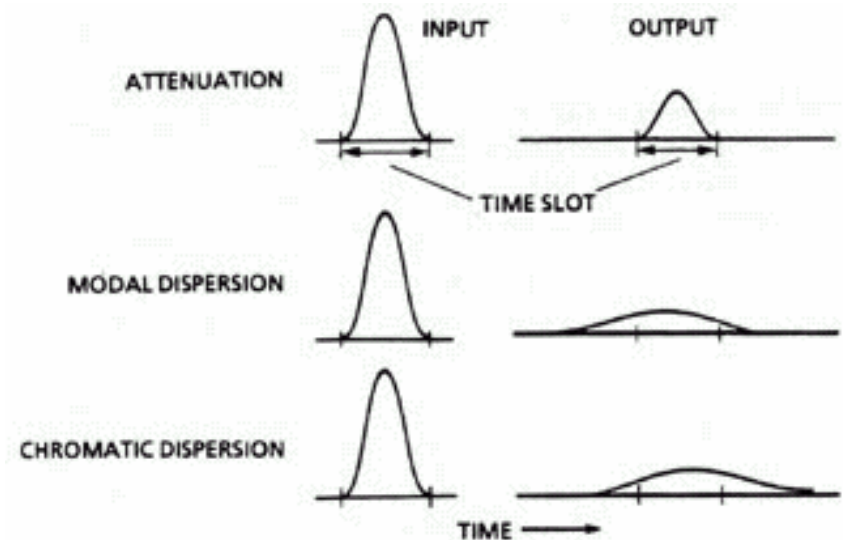
- **Se M = 1 si ha una FIBRA MONOMODALE, che presenta costi maggiori, ma prestazioni migliori. Attualmente le fibre usate nelle telecomunicazioni sono di tipo monomodale.**

Classificazione delle fibre

Fibra ottica multimodale

Fibra ottica monomodale

Variazione dell'indice di rifrazione del nucleo

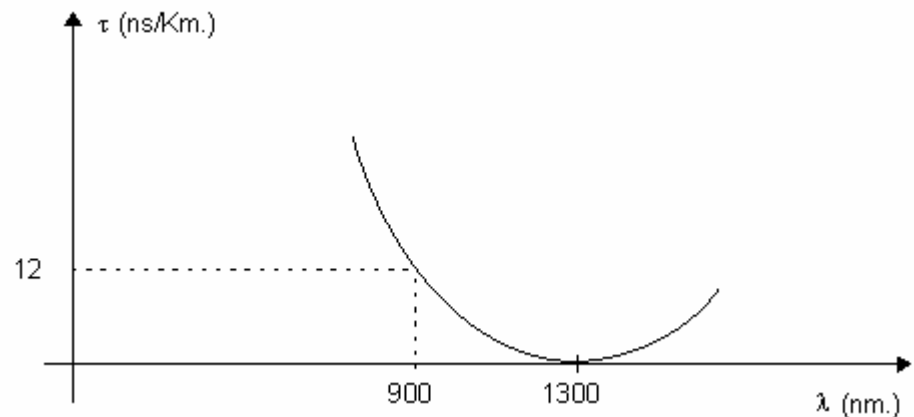
- Variazione a gradino (step index)

- Variazione a gradino (step index)

Perdite nelle fibre ottiche

- Nelle fibre sono presenti sostanzialmente due fenomeni che provocano perdite nel segnale trasmesso:
  - l'attenuazione del segnale
  - la dispersione.
- Nelle fibre si possono verificare tre cause di dispersione:
  - dispersione modale
  - dispersione del materiale
  - dispersione di guida d'onda
- Le tre dispersioni precedentemente descritte determinano una limitazione della banda passante dell'intero collegamento

Dispersione del materiale

- La *dispersione del materiale* consiste nella dipendenza della velocità di un raggio di lunghezza d'onda λ dalla composizione della fibra. Se si immette nella fibra un impulso di luce bianca, le componenti cromatiche costituenti, percorrendo la fibra con velocità differenti, arrivano al ricevitore in tempi differenti generando, così, un impulso di uscita allargato e più "basso" rispetto a quello di entrata.

Colore	N
Violetto	1,605
Azzurro	1,594
Verde	1,581
Giallo	1,575
Arancio	1,571
Rosso	1,569

- Il raggio rosso, avendo più basso indice di rifrazione, è quello che possiede maggior velocità e pertanto giunge prima al ricevitore. Per limitare la dispersione del materiale si cerca di usare luce monocromatica utilizzando diodi LASER.

Andamento del tempo di ritardo τ [ns/Km] di un raggio avente lunghezza d'onda λ rispetto a quello di riferimento avente λ =1300 nm.

Dispersione del materiale

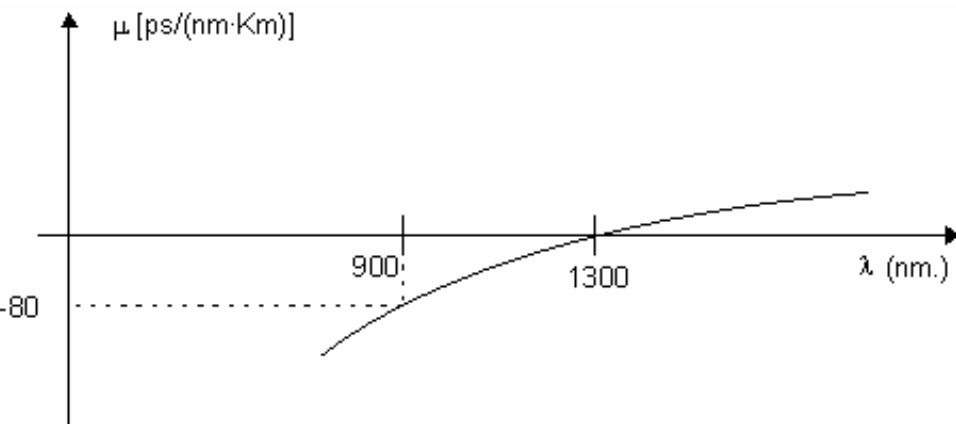
- La dispersione cromatica produce un allargamento temporale dell'impulso di luce trasmesso determinato dalla seguente relazione:

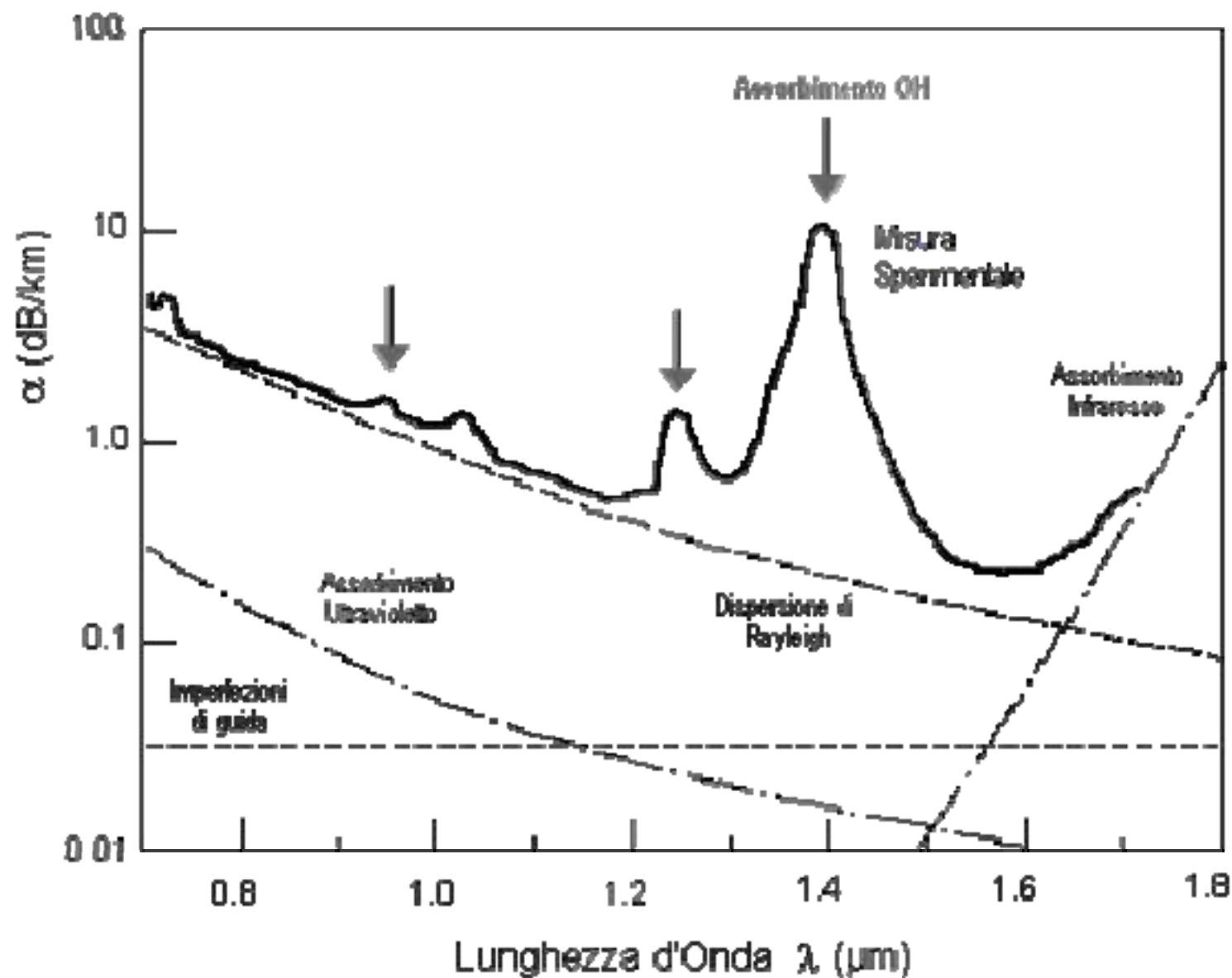
$$\Delta t_c = \mu \Delta \lambda$$

- Dove $\Delta\lambda$ rappresenta la larghezza dell'impulso ottico inviato dalla sorgente e μ un coefficiente detto coefficiente di dispersione modale.

- Esempi:
  - $\Delta\lambda$= 2 nm per il laser
  - $\Delta\lambda$= 40 nm per il LED

Esempi:

- μ = - 80 nm per λ = 900 nm.
- μ = 0 nm per λ = 1300 nm.
- μ =30 nm per λ = 1500 nm.

- il segno negativo indica che i segnali luminosi aventi λ <1300nm. Sono in ritardo rispetto a quello λ =1300nm

Attenuazione

Finestre ottiche

- I sistemi di trasmissione utilizzano tre intervalli di lunghezze d'onda dette *finestre ottiche* per le quali risultano tecnologicamente ottimizzate sia le fibre che i dispositivi trasmettitori e ricevitori di luce. Tali finestre sono:
- 1ª finestra $0.8 < \lambda < 0.9$ m m (vicino infrarosso);
- 2ª finestra $1.3 < \lambda < 1.35$ m m;
- 3ª finestra $\lambda \cong 1.55$ m m (lontano infrarosso).
- Attualmente le finestre più utilizzate sono la 2ª e la 3ª a causa delle basse perdite valutabili intorno a 0.2-0.5dB/Km.
- Per ottenere attenuazioni ancora più ridotte si possono impiegare fibre al *cloruro di potassio* (KCl).

Altre cause di perdite nelle fibre

- **Perdite nelle connessioni fra fibre**
- Derivano dal disallineamento fra le fibre accoppiate e possono essere dovute allo spostamento laterale degli assi delle fibre. Anche la differenza di indice di rifrazione del materiale del core e del materiale che separa le estremità delle due fibre accoppiate, di solito aria, è una sorgente di perdite. La connessione tra fibre è un operazione molto complessa poiché richiede estrema precisione.
- **Perdite di accoppiamento tra sorgente e fibra**
- Non tutta la potenza generata dalla sorgente può essere trasferita nella fibra. Le relative perdite sono abbastanza elevate perché la luce emessa non è contenuta tutta nel cono di accettazione della fibra. I migliori accoppiamenti, ovviamente, si hanno tra sorgenti di piccola area e fibre con core di grande diametro. Non è possibile, però, soddisfare simultaneamente queste esigenze senza peggiorare qualche altra caratteristica. I problemi di accoppiamento sorgente-fibra sono più limitati se si utilizza un diodo LASER anziché un diodo LED.
- **Perdite di accoppiamento tra fibra e fotorivelatore**
- Sono meno rilevanti delle precedenti poiché il fotorivelatore ha un'area sensibile alla radiazione maggiore di quella del core della fibra. Si usano fotodiodi PIN e a valanga.

Sorgenti ottiche

Le sorgenti del segnale luminoso possono essere LED (cioè diodi in grado di emettere luce) e laser.

Il laser è più sofisticato e costoso del diodo ma è più preciso. Per questo viene utilizzato sulle fibre monomodali

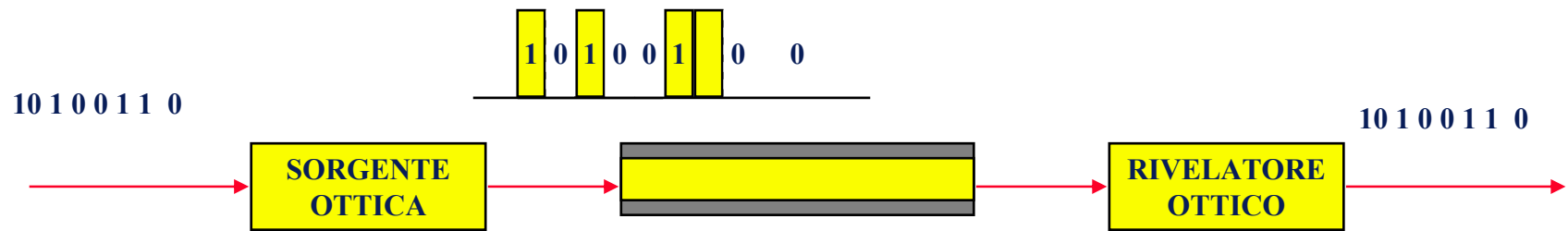
Velocità di trasmissione

Le fibre ottiche permettono di raggiungere velocità di trasmissione elevatissime. La banda a disposizione su 1 Km di fibra è di circa:

- 500 MHz se si usa una fibra multimodale e LED
- 1 GHz se si usano laser su fibra multimodale
- da decine a centinaia di GHz su fibra monomodale e con laser sofisticati.

Questo per ogni singola fibra !!!!
Ma in un cavo ci possono essere decine o centinai di fibre !!!!!

FIBRE OTTICHE
Schema del sistema di comunicazione

- **Schema generale di un sistema di comunicazione in fibra ottica**

- **Sorgenti ottiche**
  - **LED (Light Emittor Diode) : dispositivi con costo ridotto, ma con basse prestazioni**
  - **LASER :srgenti per reti con prestazioni medio-alte**

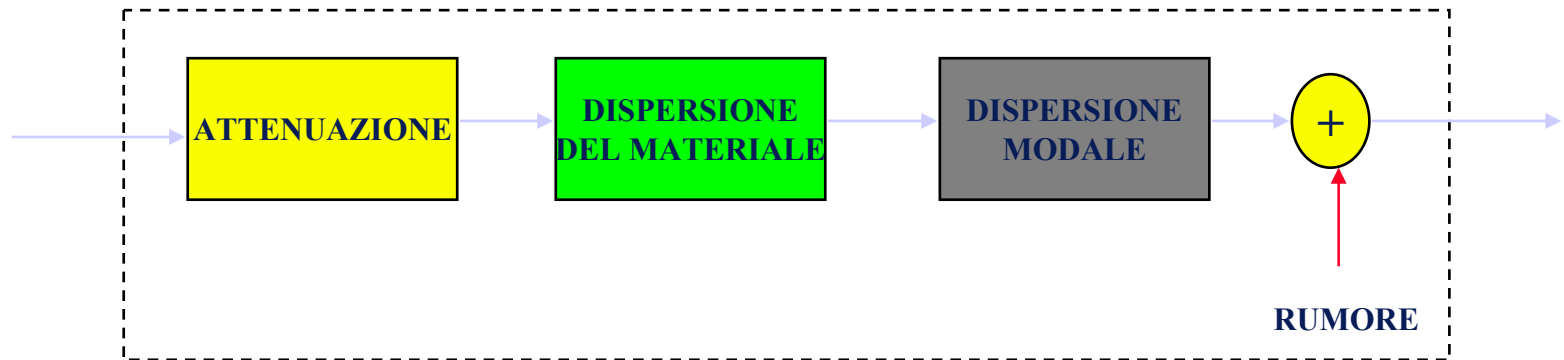
- **Rivelatori ottici**
  - **PIN (Positive-Intrinsic- Negative)**
  - **APD (Avalanche PhotoDiode)**

FIBRE OTTICHE
Sorgenti ottiche

LED

- **I LED hanno scarse prestazioni intermini di larghezza di riga emessa e di potenza emessa, mentre hanno il vantaggio di un basso costo e alta affidabilità.. Sono utilizzati dove non sono richieste bande troppo elevate e su distanze piccole. Ad esempio i LED sono molto utilizzati nell'ambito delle reti locali.**

FIBRE OTTICHE

- **FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI UNA FIBRA OTTICA**
  Il comportamento di una fibra ottica può essere schematizzato mediante tre blocchi

- **L'attenuazione viene espressa in dB/Km. Può essere considerata costante per bande molto ampie.**
- **La dispersione del materiale è dovuta a imperfezioni contenute nei materiali utilizati per la costruzione della fibra, a imperfezioni nella superficie di separazion tra nuclo e mantello e a moltri altri fattori. Essa è funzione della frequenza.**
- **La dispersione modale è dovuta ai diversi modi che si possono propagare in una fibra; esiste solo nelle fibre multimodali.**
- **Il rumore è generalmente di tipo addittivo.**

FIBRE OTTICHE

- **DISPERSIONE DEL MATERIALE**

La banda di trasmissione può essere calcolata in molti casi mediante la seguente formula approssimata :

$$B_r = (0,44\ 10^6) / (\mu\ \ \Delta\lambda\ L)$$

dove μ = coefficiente di dispersione (misurato in ps/mm) che dipende dalla finestra in cui si lavora (valori tipici sono in prima finestra μ = 100, mentre in seconfa finestra μ = 5);

L = lunghezza del collegamento in Km ;

$\Delta\lambda$ = ampiezza spettrale della sorgente. : dipende dal tipo di sorgente ottica utilizzata; (ad esempio nelle sorgenti LED $\Delta\lambda$ può variare tra 100 e 40, mentre nel caso di Laser $\Delta\lambda$ assume valori tra 4 e 10.

- **DISPERSIONE MODALE**

La banda di trasmissione è limitata dalla dispersione modale e può essere calcolata mediante la seguente formula :

$$B_m = B_0 / L^x$$

dove B_o = banda di dispersione modale della fibra su 1 Km ; L = lunghezza del collegamento in Km; x= parametro caratteristico della fibra e il cui valore varia tra 0,5 e 1.

FIBRE OTTICHE

- **BANDA TOTALE**

  La banda totale B_c può essere calcolata mediante la seguente relazione :

$$\frac{1}{B_t^2} = \frac{1}{B_m^2} + \frac{1}{B_t^2}$$

FIBRE OTTICHE

VANTAGGI OFFERTI DALLE FIBRE OTTICHE

- **Piccolo ingombro : diametro di una fibra approssimativamente di 0,1 mm, mentre un cavo coassiale ha un diametro di 10-12 mm.**
- **Flessibilità : le fibre ottiche risultano molto flessibili e possono essere cablate in qualunque ambiente.**
- **Basse attenuazioni**
- **Grandi larghezze di bande : le fibre ottiche consentono di ottenere bande di decine o centinaia di GHz / Km**
- **Basse interferenze con altre fibre (crosstalk)**
- **Bassi disturbi : nelle fibre si può raggiungere facilmente probabilità di errore inferiori a 10^{-9}.**
- **Sono immuni a disturbi elettromagnetici**
- **Sono molto resistenti alle alte temperature**

Cavi ottici

- Le fibre ottiche sono inserite in una struttura denominata *cavo ottico* in grado di resistere alle sollecitazioni esterne di trazione e torsione.
- Ogni fibra, oltre al rivestimento primario, presenta un rivestimento secondario, spesso di tipo a doppio strato, di materiale plastico. Il cavo ottico presenta delle caratteristiche che dipendono dal numero di fibre nel cavo (da quattro ad alcune centinaia), dal tipo di posa (aerea, sotterranea, sottomarina), ecc. In un cavo ottico possono prendere posto numerose fibre disposte in particolari configurazioni in funzione dell'uso che se ne fa.
- All'interno del cavo ottico è inserito un cavo di tiraggio utilizzato, durante la posa in opera, per limitare l'allungamento e la torsione che possono provocare la rottura della fibra. Il cavo è rivestito da una guaina di PVC o polietilene.

Cavi ottici

Le strutture di un cavo dipendono dalla ditta costruttrice e si dividono in:

- a) a gruppo;
- b) a nastro;
- c) a solchi;
- d) a strati concentrici.

Strati concentrici

Nastro

Solchi

Gruppi